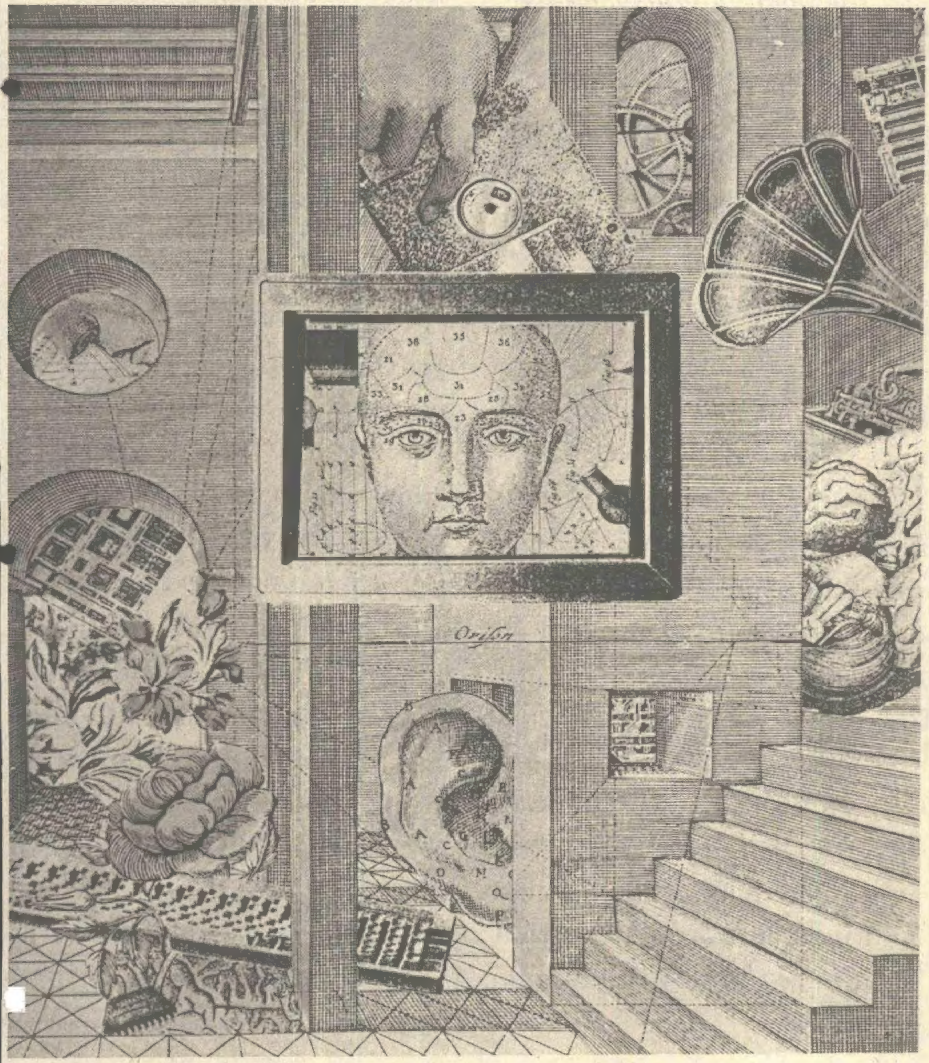
เรื่องน่าอ่าน
สุรวุฒิ สุชินโรจน์

ระบบฟัซซี่
เทคโนโลยีจอมบงการ



มาตรฐานการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฮเทคในทศวรรษใหม่

ในบรรดาผลการศึกษาวิจัยของ "ระบบฐานความรู้" (knowledge-based system) ผลงานวิจัยเกี่ยวกับ "ระบบฟัซซี่" นับว่าประสบความสำเร็จในแง่การนำมาใช้ในการผลิตเป็นสินค้ามากที่สุดอย่างหนึ่ง โดยเฉพาะประเทศญี่ปุ่นมีสินค้าตั้งแต่เครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น เครื่องซักผ้า กล้องถ่ายวิดีโอ ไปจนถึงเบรครถยนต์ ที่ใช้ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ สินค้าที่ใช้ระบบควบคุมแบบใหม่นี้ได้รับความสนใจจากผู้ซื้อ เนื่องจากใช้พลังงานน้อย บางกรณีลดลงจากเดิมถึง 20-30% ทำให้เสียค่าไฟน้อยลง ทั้งนี้เพราะระบบการควบคุมแบบฟัซซี่เป็นการควบคุมแบบต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น ในกรณีของเครื่องปรับอากาศถ้าอุณหภูมิห้องลดต่ำลงเล็กน้อย ระบบนี้ก็จะทำให้เครื่องทำงานน้อยลงเล็กน้อยด้วย ถ้าอุณหภูมิในห้องสูงขึ้นเครื่องก็จะทำงานมากขึ้นเป็นสัดส่วนต่างกับระบบการควบคุมแบบธรรมดาที่จะตัดไฟเปิดหรือปิดเครื่องไปเลย ในกรณีของเบรครถยนต์ระบบการควบคุมแบบฟัซซี่ จะทำให้รถไม่ปัดไปมาเวลาเบรคบนถนนลื่น ด้วยการปรับระดับการเบรคให้เข้ากับความเร็วของรถและสภาพถนน ความสำเร็จของระบบการควบคุมแบบนี้ ทำให้มีการผลิตสินค้าที่เรียกชื่อเป็นฟัซซี่ออกมาสู่ตลาดมากขึ้นเรื่อย ๆ เป็นไปได้ว่าระบบฟัซซี่อาจกลายเป็นวิธีการมาตรฐานในการควบคุมระบบอัตโนมัติแทนวิธีการมาตรฐานแบบเดิมก็ได้

ระบบฟัซซี่เป็นเรื่องค่อนข้างใหม่ในวงการคอมพิวเตอร์ บทความฉบับนี้จึงพยายามอธิบายพื้นฐานแนวความคิดและวิธีการทำงานของระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่ ในลักษณะที่มุ่งให้เข้าใจความหมายและความสำคัญเป็นหลัก จุดมุ่งหมายประการหนึ่ง คือ เพื่อให้มองเห็นภาพของปัญหาในงานที่ระบบฟัซซี่อาจนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ ส่วนอีกประการหนึ่ง เพื่อให้เข้าใจการทำงานของระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่ซึ่งเป็นประเด็นหลักในบทความนี้

เว้นแต่นิยามเบื้องต้นที่จำเป็นในการที่จะเข้าใจกลไกที่สำคัญแล้ว จะขอเว้นการพิจารณาในเชิงคณิตศาสตร์เสีย (เนื้อหาของระบบฟัซซี่มักจะอธิบายในเชิงคณิตศาสตร์ในเอกสารโดยมาก) ความโดยละเอียดของการศึกษาทางด้านนี้อาจศึกษาได้จากวารสารต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวารสาร Information and Control และ Journal of Cybernetics หรือจากหนังสือซึ่งปัจจุบันมีผู้เขียนออกมาหลายเล่ม รายชื่อหนังสือเหล่านี้ได้ให้ไว้ในตอนท้ายของบทความนี้ เอกสารที่มีเครื่องหมาย (*) แสดงว่าผู้เขียนมีอยู่ในครอบครองมีความยินดีที่จะเผยแพร่

ความหมาย

คำว่า "ฟัซซี่" (fuzzy) เป็นคำวิเศษณ์ แปลว่า "คลุมเครือ" "ไม่กระจ่าง" ใช้เป็นครั้งแรกในทางปัญญาประดิษฐ์ในนิยามของ "fuzzy set" ซึ่งหมายถึงเซตที่สมาชิกไม่เป็นที่แน่ชัดว่าจะรวมอยู่ในเซตหรือเปล่า ตัวอย่างเช่น "เซตของคนแก่" ไม่เป็นที่ตกลงกันแน่ชัดว่าคนแก่คือคนอายุเท่าไหร่ ถามว่าคนอายุ 40 เป็นคนแก่หรือไม่ หลายคนคงให้คำตอบต่างกันคนที่อายุเลยสี่สิบไปแล้วอาจจะบอกว่ายังไม่แก่ แต่สาว ๆ คงจะบอกว่าแก่แล้ว เป็นต้น ดังนั้นคนแต่ละคนจะจัดว่าเป็นสมาชิกของ "เซตของคนแก่" หรือไม่ ก็โดยดีกรีเท่านั้น คนที่อายุ 90 ก็มีความเป็นคนแก่มากหน่อย แต่คนอายุ 40 อาจจะมีดีกรีของความแก่ต่ำลงมา

ผู้ที่เสนอความหมายของฟัซซี่เซตขึ้นเป็นคนแรกคือ Lofti A. Zadeh อาจารย์วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์จากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เมืองเบอร์คเลย์ เขียนขึ้นเป็นบทความปี ค.ศ. 1965 ซาเดห์มองนิยามของเซตในรูปของฟังก์ชันที่เรียกว่า "ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก" (membership function) ดังรูปที่ 1

การมองเซตลักษณะนี้ทำให้สามารถพูดถึงสมาชิกแต่ละตัวของเซตในแง่ของดีกรีความเป็นสมาชิก โดยการกำหนดให้โคโดเมน (codomain) ของฟังก์ชันเป็นช่วงปิดจากศูนย์ถึงหนึ่งดีกรีของความเป็นสมาชิกนี้ก็จะได้เป็นค่าต่อเนื่อง (real number) ดังนั้นจึงนิยามฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซี่เซตได้ดังนี้

$f_A : X \rightarrow [0, 1]$ เมื่อ A เป็นฟัซซี่เซต

จากนิยามนี้เราก็สามารถที่จะทำปฏิบัติการต่าง ๆ กับฟัซซี่เซตได้ เช่น ถ้า A และ B เป็นฟัซซี่เซตสองเซต เราก็สามารถนิยาม A ยูเนี่ยน B หรือ A อินเตอร์เสค B ได้ ฯลฯ เกิดเป็นทฤษฎีของฟัซซี่เซตขึ้น

ให้ X เป็น universal set (คือเซตที่ประกอบด้วยสมาชิกที่ต้องการจะพูดถึงทั้งหมด)
ให้ A เป็นซับเซตของ X
"ฟังก์ชันสมาชิก" ของ A สามารถให้นิยามได้เป็น $f_A : X \leftarrow [0,1]$ โดยที่

1. $f_A(X) = 1$ ถ้า X เป็นสมาชิกของ A
2. $f_A(X) = 0$ ถ้า X ไม่เป็นสมาชิกของ A

รูปที่ 1 นิยามของเซตในรูปฟังก์ชันที่เรียกว่า "ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก"

ข้อสำคัญสองประการที่ควรสังเกตในที่นี้คือ

1. เซตเป็นออปเจ็คต์ (object) พื้นฐานที่ใช้ในการสร้างทฤษฎีอื่น ๆ ทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นทฤษฎีอื่น ๆ ทางคณิตศาสตร์จึงสามารถถูกเลียนแบบขึ้นเป็นทฤษฎีฟัซซี่ได้ทั้งหมดคือ สามารถที่จะสร้างฟัซซี่ตรีโกณ ฟัซซี่เรขาคณิต ฟัซซี่แคลคูลัส ฯลฯ

2. สิ่งต่าง ๆ โดยมาก สามารถมองในแง่ของ "ความเป็น" สิ่งนั้น ๆ ได้ เช่น สมมติว่าเราสนใจใน "ก๋วยเตี๋ยว" เราย่อมสามารถคิดถึงก๋วยเตี๋ยวในแง่ของ "ค่าความเป็นก๋วยเตี๋ยว" ได้ คือเป็นก๋วยเตี๋ยวมากน้อยแค่ไหน วิธีการพิจารณา "ค่าความเป็น" ของสิ่งต่าง ๆ ในลักษณะนี้เรียกว่าเป็นการ fuzzify สิ่งนั้น ๆ วิธีการฟัซซี่ฟายนี้ คือ กลไกที่สำคัญที่สุดในทฤษฎีฟัซซี่เซต เนื่องจากสามารถใช้เปลี่ยนสิ่งที่เป็นที่ชัดเจนให้เป็นสิ่งที่ฟัซซี่ได้เสมอ ซาเดห์ใช้กลไกนี้เปลี่ยนค่าทางตรรกะคือ TRUE และ FALSE ในตรรกศาสตร์ให้เป็นฟัซซี่ คือค่าที่เป็นจริงกลายเป็น "จริง" อย่างมีระดับของความเป็นจริง และค่าที่ "ไม่จริง" ก็กลายเป็นการ "ไม่จริง" อย่างที่เป็นระดับ ทำให้เกิดเป็นตรรกศาสตร์แบบฟัซซี่ขึ้น ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ในงานทางภาษาธรรมชาติ (natural language processing)

นอกจากนี้แล้วก็ยังมีเรื่องอื่นอีกหลายเรื่องที่ถูกฟัซซี่ฟายในทำนองนี้ เช่น fuzzy pattern recognition, fuzzy automata, fuzzy program ฯลฯ แต่ส่วนใหญ่ของพัฒนาการเหล่านี้ ไม่ปรากฏว่าเป็นประโยชน์ในการใช้งาน เช่น ฟัซซี่โปรแกรม ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำสั่งแบบคลุมเครือ

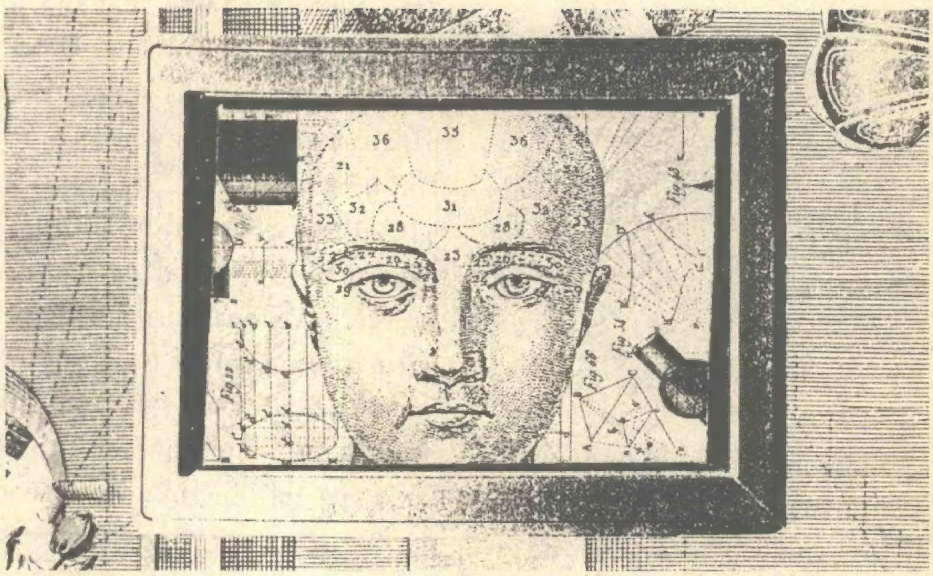
ตัวอย่างเช่น โปรแกรมที่เคลื่อนจุดไปบนแผนที่ด้วยคำสั่งประเภท "ตรงไปประมาณ 200 เมตร เลี้ยวซ้ายตรงไปอีกประมาณ 100 เมตร จนกระทั่งไปถึงธนาคาร" โดยนักวิจัยชาวญี่ปุ่น แต่ไม่ปรากฏว่ามีการพัฒนาต่อไปถึงระดับที่จะใช้ประโยชน์แต่อย่างใด

ฟัซซี่เซตตามที่นิยามไว้ข้างต้นนี้สามารถแสดงเป็นตัวอย่างง่าย ๆ ดังนี้ สมมติพูดถึง "เซตของวัยรุ่น" และเราพูดถึงคน 3 คนคือ ตุ่ม ต้อย และต้อย ซึ่งมีอายุตามลำดับคือ 5 ขวบ 14 ขวบ และ 22 ขวบ ถ้าในกรณีนี้เราถือว่าคนอายุต่ำกว่า 10 ขวบ ไม่เป็นวัยรุ่นและคนอายุ 22 ก็แทบจะพ้นวัยรุ่นไปแล้ว เราอาจได้เซตของวัยรุ่นที่ประกอบด้วยสามคนนี้ ดังนี้ A = {ตุ่ม/0.0 ต้อย/1 ต้อย/0.2} ตัวเลขหลัง/คือดีกรีความเป็นสมาชิกของเซตของแต่ละคน ซึ่งเป็นค่าของฟังก์ชันสมาชิกนั่นเอง

ระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่

ฟัซซี่เซตเป็นความคิดทางคณิตศาสตร์ นำมาใช้ประโยชน์ในทางคอมพิวเตอร์ (ในขอบเขตของเรื่องที่จะอธิบายในบทความนี้) ในรูปของระบบผู้เชี่ยวชาญซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ๆ ทำงานเป็นกลไกสำหรับควบคุมการทำงานของระบบอัตโนมัติอีกที ในกรณีของเครื่องใช้เช่น กล้องถ่ายรูป โปรแกรมที่กล่าวนี้ เป็นโปรแกรมที่บรรจุอยู่ในหน่วยความจำของ single chip computer (คอมพิวเตอร์บนชิพตัวเดียว) หน่วยความจำนี้อาจมีขนาดเล็กประมาณ 2 กิโลไบต์

จะขออธิบายลักษณะการทำงานของระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่ โดยใช้ตัวอย่างระบบที่ใช้งานอยู่จริง คือ ระบบ



ควบคุมการผลิตซีเมนต์ของบริษัท F.L. Smidth & Co. ประเทศเดนมาร์ก มีชื่อเรียกว่า FLS Supervision, Dialog and Reporting System (SDR) เป็นระบบที่ใช้กับเครื่องฮิวเลตต์แพคการ์ด HP Micro 26 A600 ขนาดหน่วยความจำ 256 เค ไม่มีดิสก์ไดรฟ์ แต่มีจอและคีย์บอร์ดต่อสัญญาณควบคุมผ่านทาง RS232

สิ่งแรกที่จะต้องเข้าใจก่อนในที่นี้คือ ลักษณะของปัญหาหรือองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องในการควบคุมการผลิตซีเมนต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้คร่าว ๆ ดังนี้

การผลิตซีเมนต์

เตาเผาซีเมนต์มักเป็นเตาหมุนขนาดใหญ่ซึ่งต้องใช้เชื้อเพลิงให้ความร้อน การควบคุมความร้อนภายในเตา คือหน้าที่หลักของระบบควบคุม วิธีการต้องคอยระวังการป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปในเตา ขณะที่เตาหมุนไปเรื่อย ๆ การหมุนของเตาจะกระจายความร้อนไปยังส่วนต่าง ๆ ของปูนที่ขังอยู่ในถัง การป้อนเชื้อเพลิงนี้ต้องให้สอดคล้องกับสภาพการเผาไหม้ในเตาอยู่ตลอดเวลา บางครั้งผู้ควบคุมต้องลดปริมาณเชื้อเพลิงในเตาลง บางครั้งก็ต้องเพิ่มเชื้อเพลิงเข้าไปในเตา โดยให้ประสานกับองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น ความเร็วการหมุนของเตา ปริมาณของซีเมนต์ ปริมาณของอากาศที่อัดเข้าไปในเตา ซึ่งเป็นปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

การออกแบบระบบควบคุมแบบอัตโนมัติสำหรับการจัดการเตาเผาซีเมนต์ต้องอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ค่อนข้างสลับซับซ้อน เนื่องจากความเกี่ยวเนื่องกันของตัวแปรหลาย ๆ ตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสัมพันธ์เหล่านี้ไม่เป็นสัดส่วนเส้นตรง (nonlinear) ระบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานได้ผลดีเป็นระบบที่มีราคาแพงเพราะยากแก่การสร้าง ในทางทฤษฎีนี่เป็นเพราะว่าการใช้คณิตศาสตร์แบบทั่วไป เป็นการใช้วิธีการที่เที่ยงตรงมาแก้ปัญหาที่เป็นแบบฟัซซี่ (ปัญหาที่เงื่อนไขบางอย่างไม่ชัดเจน) ทำให้ต้องมีการปรับหรือจัดค่าเป็นกรณีพิเศษเป็นอันมาก (feedback correction) สังเกตได้จากตัวอย่างของหลักเกณฑ์ในการควบคุมการป้อนเชื้อเพลิงได้ดังนี้

ถ้าออกซิเจนต่ำกว่าปานกลางเล็กน้อย ให้ลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิง และถ้าเตาหมุนช้าลง และปูนในเตามีน้อย ให้เร่งอัตราการป้อนเชื้อเพลิง แต่ถ้าเตาหยุดหมุน ให้ลดอัตราเชื้อเพลิง และถ้าหากเตาหยุดหมุน แต่มีปูนอยู่ปานกลาง รักษาปริมาณเชื้อเพลิงไว้ ถ้าปูนมาก ให้เติมเชื้อเพลิง.....

หลักเกณฑ์ที่ค่อนข้างคลุมเครือนี้ แม้เป็นเรื่องที่พอเข้าใจได้โดยบุคลากรผู้ชำนาญงานที่ทำอยู่ทุกวันจนมีความรู้สึกเป็นอัตโนมัติว่าเมื่อไรควรเพิ่มหรือลดเชื้อเพลิง แต่การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาควบคุมงานแบบนี้ทำได้ยาก เพราะว่า "ออกซิเจนต่ำกว่าปานกลางเล็กน้อย" หมายความว่าอย่างไรเป็นเรื่องที่ไม่ชัดเจนนัก และเมื่อเตาหมุนช้าลงสักครึ่งรอบต่อนาทีกับปูนกี่ตันจึงจะเป็นภาวะของเงื่อนไขให้เพิ่มหรือลดเชื้อเพลิง

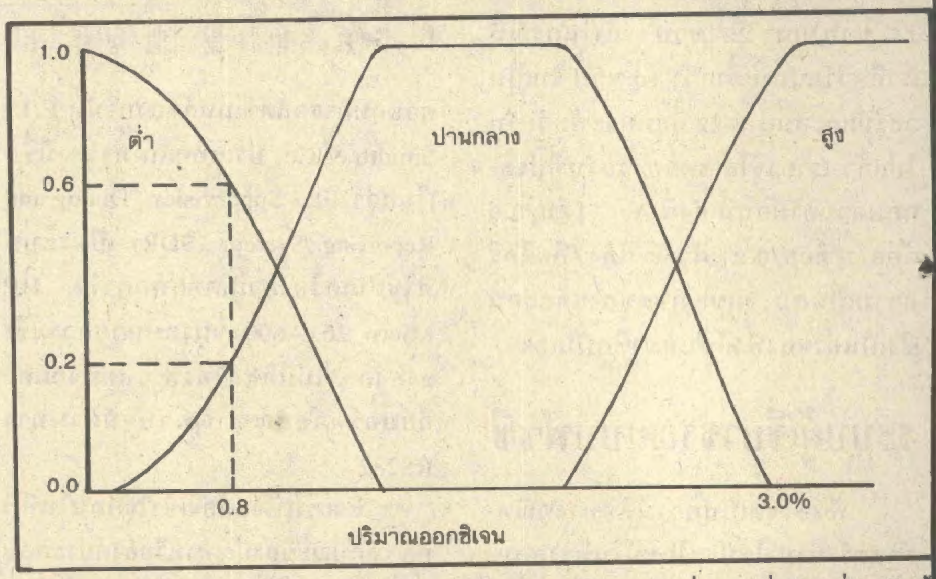
วิธีการโดยปกติในการออกแบบระบบควบคุมงานแบบนี้ แก้ปัญหาความคลุมเครือโดยการตัดช่วงของค่า เช่น ถ้ามีออกซิเจนอยู่ในเตา 0.0% ถึง 1.5% ให้ถือว่ามีออกซิเจนต่ำ ถ้ามีอยู่ระหว่าง 1.5% ถึง 3.5% ก็ถือว่ามีอยู่ปานกลาง เป็นต้น วิธีการง่าย ๆ ที่ดีกว่านี้ คือ การใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่ อย่างเช่นในระบบ SDR ที่เอ่ยถึงในตอนต้น ปัจจุบันระบบ SDR นี้มีใช้อยู่ในโรงงานซีเมนต์กว่า 30 แห่ง

วิธีการทำงานของระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่

แทนที่จะตัดค่าความสูงต่ำของปริมาณเป็นช่วง ๆ เราอาจกำหนดให้ค่า "ต่ำ", "ปานกลาง" หรือ "สูง" เหล่านี้เป็นฟัซซี่เซตเสีย โดยการกำหนดฟังก์ชันสมาชิกให้กับค่านั้น ๆ ตัวอย่างเช่น ค่าปริมาณของออกซิเจน เราอาจกำหนดให้เป็นฟัซซี่เซต 3 เซต ได้ดังรูปที่ 2 จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าที่แต่ละเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจน ค่าปริมาณของออกซิเจนอาจมีความหมายได้มากกว่าหนึ่งความหมาย เช่นค่าที่ 0.8 เปอร์เซ็นต์ ถือว่าเป็นค่าออกซิเจน "ต่ำ" 0.6 แต่ขณะเดียวกันก็เป็นค่าออกซิเจน "ปานกลาง" 0.2 แต่ไม่ถือว่าเป็นค่าออกซิเจน "สูง" เลย (คือ 0.00)

สมมติว่าโปรแกรมควบคุมการป้อนเชื้อเพลิงพิจารณาปัจจัยเพียงตัวเดียว คือ ปริมาณของออกซิเจน โดยพิจารณาค่าความสูงต่ำของปริมาณออกซิเจนเป็นตัวแปรอิสระอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเป็นตัวแปรตาม โดยอาศัยกฎเกณฑ์ดังนี้

1. ถ้าออกซิเจนต่ำ ให้เติมเชื้อเพลิง
2. ถ้าออกซิเจนปานกลาง ให้รักษาปริมาณเชื้อเพลิงไว้
3. ถ้าออกซิเจนสูง ให้ลดเชื้อเพลิง



รูปที่ 2 ฟัซซี่เซตสำหรับปริมาณออกซิเจน ต่ำ ปานกลาง และสูง สังเกตค่าออกซิเจนที่ 0.8% ซึ่งเป็นค่าที่จัดอยู่ในทั้งปริมาณ "ต่ำ" และ "ปานกลาง" ในเวลาเดียวกัน

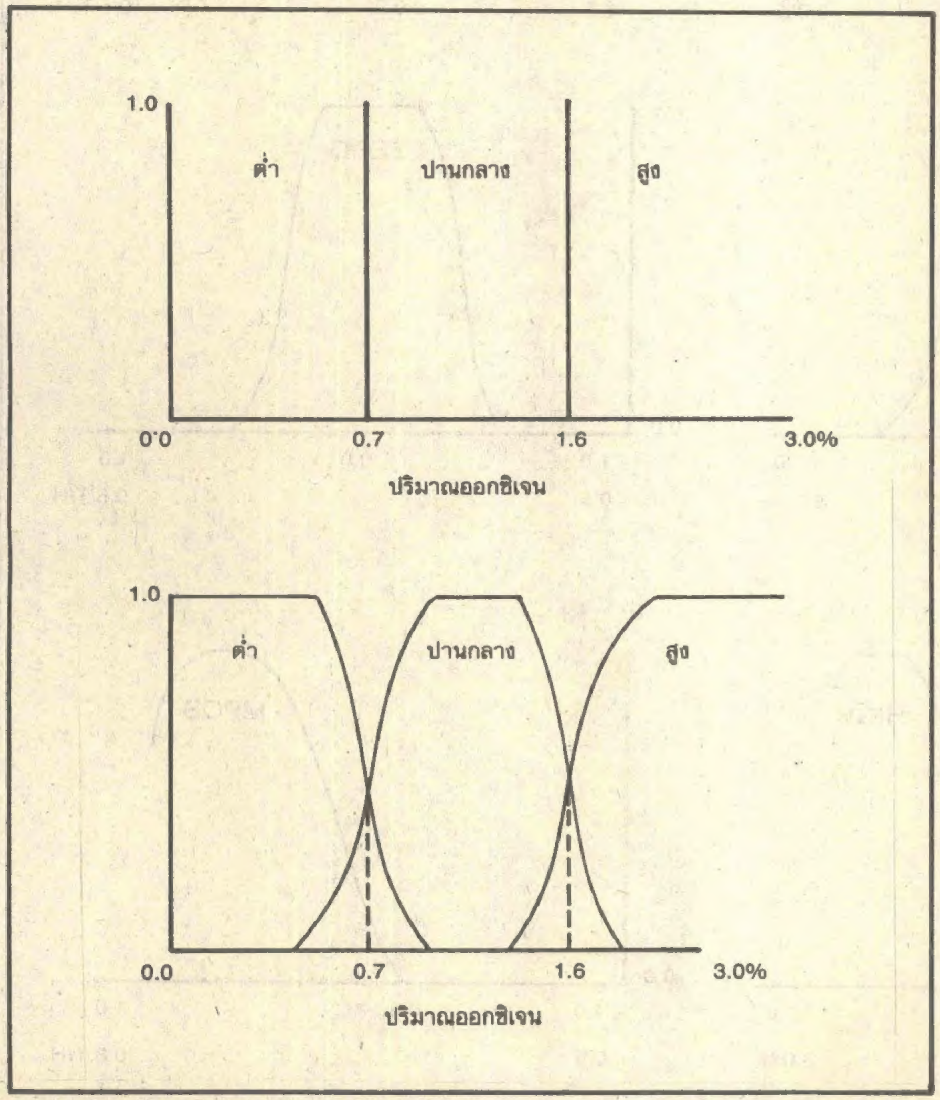
```
0 NAME: W1X2CTL \ 1 \
1 *
2 * THIS PROGRAM CONTROLS THE OXYGEN
  BY ADJUSTING
3 * THE COAL FEED RATE.
4 *
5 INPUT OX \ W1W01X1, 0.7, 1.6, 3 \
6 OUTPUT DCOAL \ W1V19SP, 0.5 \
7 *
8 IF LOW (OX)  THEN MNEG (DCOAL)
9 IF OK (OX)   THEN ZERO (DCOAL)
10 IF HIGH (OX) THEN MPOS (DCOAL)
11 *
12 END
```

รูปที่ 3 โปรแกรมควบคุมการป้อนเชื้อเพลิงตามปริมาณของออกซิเจน

เราสามารถเขียนหลักเกณฑ์เหล่านี้เป็นโปรแกรมในภาษา SDR ดังแสดงในรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 บรรทัดที่ 5 แสดงจุดแบ่งระยะของช่วงที่ถือว่าค่าออกซิเจนต่ำ ปานกลาง และสูง ตามลำดับ (แต่การแบ่งนี้ไม่เหมือนการแบ่งของช่วงในระบบคลาสสิก) ส่วนบรรทัดที่ 6 บอกว่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง -0.5 ตันต่อชั่วโมงจนถึง +0.5 ตันต่อชั่วโมง ลองเปรียบเทียบลักษณะความหมายของปริมาณออกซิเจนระหว่างวิธีใช้ฟัซซี่เซตกับแบบคลาสสิกในรูปที่ 4

บรรทัดที่ระบุกฎเกณฑ์ควบคุมการป้อนเชื้อเพลิงคือ บรรทัด 8, 9 และ 10 คำว่า LOW ในบรรทัดที่ 8 เป็น "ฟังก์ชันสมาชิก" ดังที่อธิบายไว้แล้ว ส่วนคำว่า OX เป็นตัวแปรที่มีค่าเป็นปริมาณของออกซิเจนที่เครื่องจะได้จาก sensor ส่วนคำว่า OK(OX) ในบรรทัดที่ 9 และ HIGH(OX) ในบรรทัดที่ 10 สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันนี้ ความเป็น "จริง" หรือ "ไม่จริง" (หมายถึง TRUE หรือ FALSE) ของ LOW(OX) OK(OX) และ HIGH(OX) ขึ้นอยู่กับการคำนวณของฟังก์ชันว่าได้ค่าเป็นศูนย์หรือไม่ ถ้าค่าเป็นศูนย์ก็ถือว่า "ไม่จริง" ประโยค IF นั้นก็ไม่ทำงาน (ในบางระบบอาจมีการกำหนดค่าการยอมรับขั้นต่ำขึ้นไว้ เช่น จะเป็น "จริง" ก็ต้องได้เป็นค่าอย่างน้อย 0.2 เป็นต้น เรียกเป็นศัพท์ทั่ว ๆ ไปว่าค่า threshold)



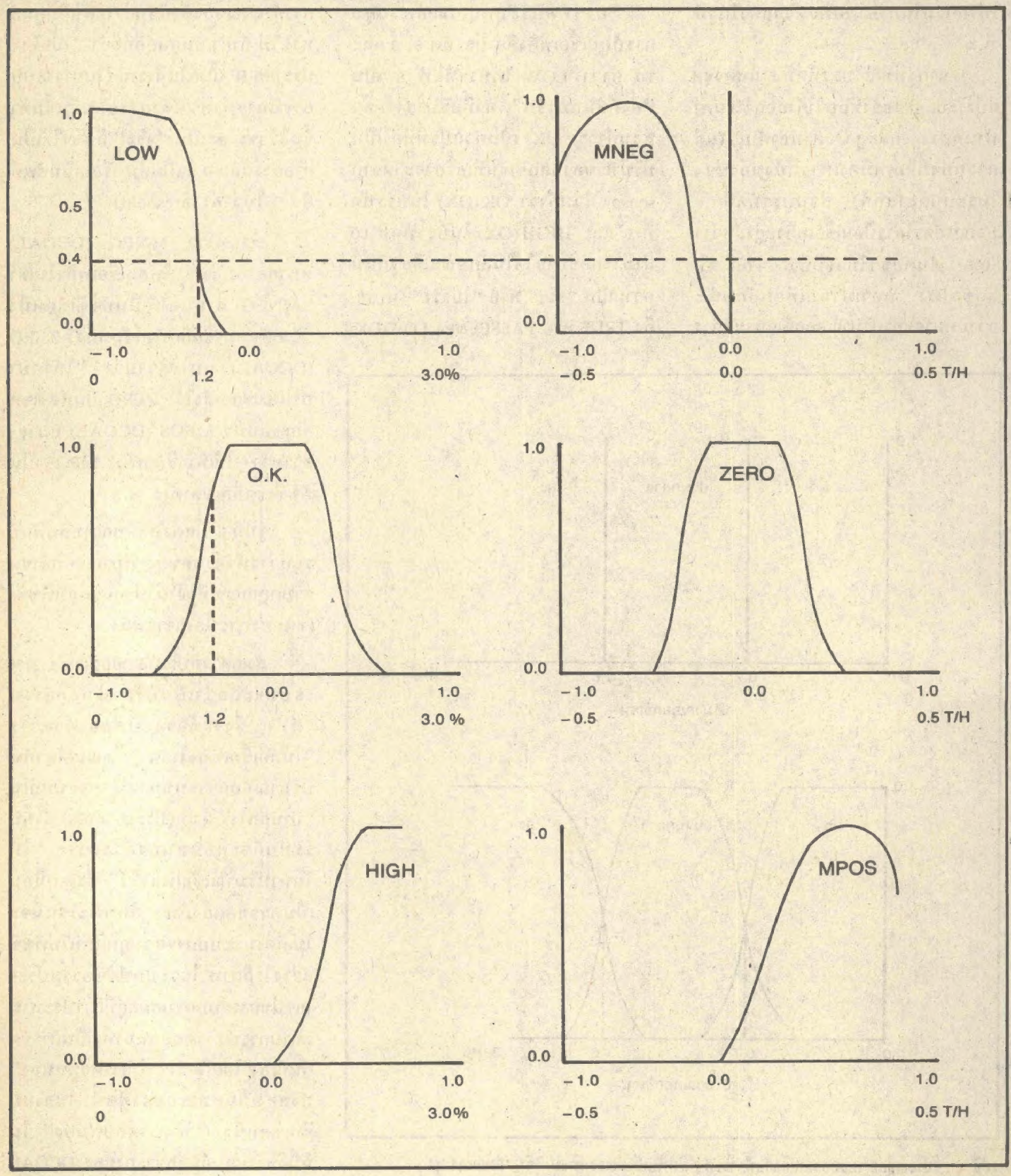
รูปที่ 4 เปรียบเทียบเซตแบบคลาสสิกกับฟัซซี่เซต สำหรับปริมาณออกซิเจน ต่ำ ปานกลาง สูง

ส่วนคำว่า MNEG (DCOAL) หมายความว่า "ให้ลดเชื้อเพลิงในเตา" "MNEG กำหนดให้เป็นฟัซซี่เซตหนึ่ง (ฟังก์ชันสมาชิกอีกฟังก์ชันหนึ่ง) ZERO (DCOAL) หมายความว่า "ให้รักษาปริมาณเชื้อเพลิงไว้" ZERO เป็นฟัซซี่เซตอีกเซตหนึ่ง MPOS (DCOAL) หมายความว่า "ให้เพิ่มเชื้อเพลิง" MPOS เป็นฟัซซี่เซตอีกเซตหนึ่ง

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างฟัซซี่เซตของปริมาณออกซิเจนตามกฎเกณฑ์ที่ใช้ในโปรแกรมกับฟัซซี่เซตของการป้อนเชื้อเพลิง

สังเกตว่าที่ปริมาณออกซิเจน 1.21% ระบบจะถือว่าเป็นปริมาณออกซิเจน "ต่ำ" ซึ่งจะต้องตอบสนองด้วยการ "ให้ลดเชื้อเพลิงในเตา" ขณะเดียวกันปริมาณออกซิเจนขนาดนี้ จะนับเป็น "ปานกลาง" ด้วย (ประมาณ 0.9) ดังนั้นระบบก็จะตอบสนองด้วยการ "ให้รักษาปริมาณเชื้อเพลิงไว้" ซึ่งดูเหมือนเป็นการขัดแย้งกัน ลักษณะเช่นนี้จะไม่เกิดในระบบการควบคุมแบบไม่ฟัซซี่ อย่างไรก็ตาม ในระบบฟัซซี่อรรถประโยชน์ของระบบควบคุมอยู่ที่การประสานสถานการณ์การตอบสนองที่ดูเป็นการขัดกันนี่เอง โดยถือว่า "ค่าการตอบสนอง" ทั้งสองเป็นสมาชิกของฟัซซี่ เซตใหม่อีกเซตหนึ่ง ("ค่าการตอบสนอง" ในที่นี้คือจำนวนตันต่อชั่วโมงของ DCOAL

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของฟัซซี่เซตของปริมาณออกซิเจนกับฟัซซี่เซตของการป้อนเชื้อเพลิง



ซึ่งเป็นอัตราการลดหรือเพิ่มการป้อนเชื้อเพลิง ดูได้จากแกน X ในภาพด้านขวาของรูปที่ 6 ซึ่งมีหลายวิธีที่สามารถใช้เพื่อหาค่าที่เป็นผลร่วมของสถานการณ์สองอย่างนี้ออกมาได้ เช่น วิธีการที่เรียกว่า การหาศูนย์กลางความถ่วง ซึ่งมีสูตรดังนี้

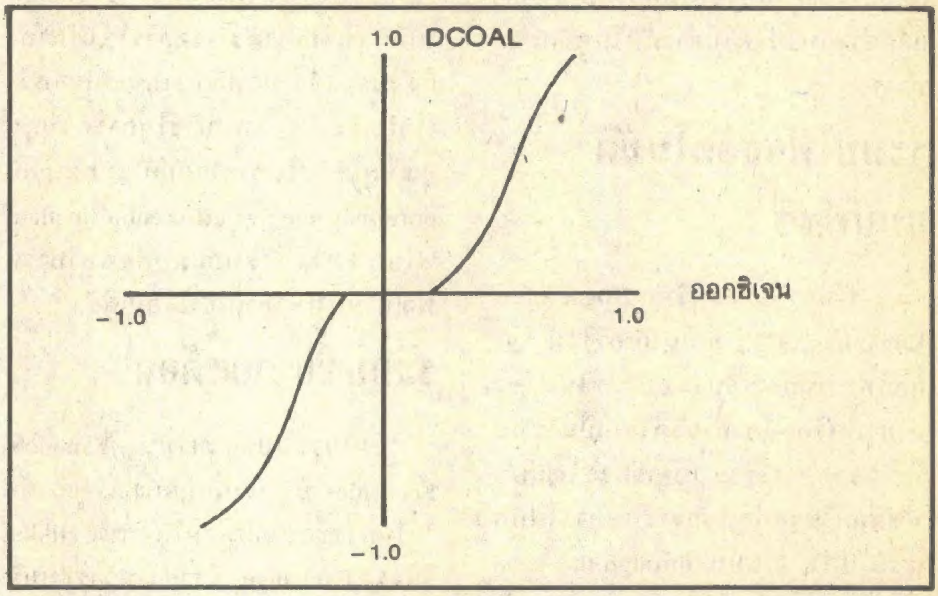
$$g = \sum_{x \epsilon X} \frac{x \cdot M_C(x)}{\sum_{x \epsilon X} M_C(x)}$$

โดยที่ x เป็นสมาชิกของ X และ M_C เป็นฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซี่เซต ซึ่งในกรณีนี้เป็นฟัซซี่เซตที่แทนสถานการณ์ร่วมระหว่างการลดเชื้อเพลิงในเตาและการรักษาปริมาณเชื้อเพลิง ในลักษณะคำอธิบายฟัซซี่เซตนี้คือ ฟัซซี่เซต "ลดเชื้อเพลิงในเตาลงเล็กน้อย" อีกวิธีหนึ่งอาจใช้สูตรความสัมพันธ์แบบเซนทรอยด์ (centroid) โดยการปรับพื้นที่ใต้ curve ของฟัซซี่เซตทั้งสองที่เกี่ยวข้องแล้วหาค่าศูนย์กลาง ค่าที่ได้นี้จะเป็นค่าเลขเดี่ยว เช่น ในกรณีนี้อาจจะได้เป็น −0.105 ซึ่งหมายถึงระบบจะลดเชื้อเพลิงในเตาลง 0.105 ตันต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 6 แสดงให้เห็นความต่อเนื่องของการควบคุมแบบนี้ในลักษณะกราฟ

ดังที่กล่าวแล้วว่าในเตาเผาซีเมนต์จริง ๆ ตัวแปรที่สัมพันธ์กันในลักษณะที่อธิบายให้เห็นเป็นตัวอย่างนี้มีอยู่หลายตัว ตัวอย่างโปรแกรมในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นกฎเกณฑ์ที่ใช้ซึ่งประกอบด้วยความสัมพันธ์ที่มากขึ้นอีกเล็กน้อย โดยการพิจารณาความเร็วการหมุนของเตาและปริมาณของปูนในเตาร่วมกับการป้อนเชื้อเพลิงด้วย กฎเกณฑ์เหล่านี้เป็นกฎเกณฑ์อย่างง่าย ๆ ในความเป็นจริงความซับซ้อนของกฎเกณฑ์จะมีมากกว่านี้ จำนวนของฟัซซี่เซตในโปรแกรมก็จะมีมากขึ้นด้วย

ตัวอย่างการใช้ประโยชน์อื่น ๆ

ปัจจุบันการใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่ในการควบคุมระบบอัตโนมัติมีเป็นจำนวนมาก ทั้งระบบขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ในที่นี้จะแสดงเป็นตัวอย่างเฉพาะสิ่งที่เป็นที่น่าสนใจเพื่อเป็นแนวความคิด ระบบเหล่านี้มีความสลับซับซ้อนผิดแผกแตกต่างกัน แต่ทุกระบบมีแนวความคิดพื้นฐานในการใช้ระบบ



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของออกซิเจนกับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง

```
 0 NAME W1CONTL \ 2 \
 1 *
 2 * SIMPLIFIED CONTROL RULES.
 3 * EACH RULE DEFINES ADJUSTMENT OF THE FUEL RATE (DFUEL)
 4 * BASED ON MEASUREMENTS OF THE CHANGE IN KILN DRIVE TORQUE
 5 * (DTQUE) AND THE FREE LIME CONTENT (FCAO).
 6 *
 7 INPUT DTQUE \ W1W03X1,-3,0,3 \
 8 INPUT FCAO \ W1W03V2,0.3,0.9,1.5 \
 9 OUTPUT DFUEL \ W1V19SP,0.2 \
10 *
11 IF ZERO (DTQUE) AND LOW (FCAO) THEN MNEG (DFUEL)
12 IF ZERO (DTQUE) AND OK (FCAO) THEN ZERO (DFUEL)
13 IF ZERO (DTQUE) AND HIGH (FCAO) THEN MPOS (DFUEL)
14 *
15 IF NEG (DTQUE) AND LOW (FCAO) THEN SPOS (DFUEL)
16 IF NEG (DTQUE) AND OK (FCAO) THEN MPOS (DFUEL)
17 IF NEG (DTQUE) AND HIGH (FCAO) THEN LPOS (DFUEL)
18 *
19 IF POS (DTQUE) AND LOW (FCAO) THEN LNEG (DFUEL)
20 IF POS (DTQUE) AND OK (FCAO) THEN MNEG (DFUEL)
21 IF POS (DTQUE) AND HIGH (FCAO) THEN SNEG (DFUEL)
22 *
23 END
```

รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างโปรแกรมที่มีความสัมพันธ์ของความเร็วการหมุนของเตาและปริมาณของปูนในเตาในการพิจารณาด้วย

ผู้เชี่ยวชาญในการควบคุมโปรเซสเป็นอย่างเดียวกัน คือ เป็นการใช้ระบบควบคุมที่สร้างง่ายราคาถูกเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เดิม ในที่นี้จะไม่ขออธิบายรายละเอียดการทำงานของแต่ละระบบ เนื่องจากมีความปลีกย่อยแตกต่างกันไปแต่ไม่ต่างกันในหลักการทำงาน

ระบบโฟกัสอัตโนมัติแบบฟัซซี่

พัฒนาขึ้นโดยบริษัท Togai Infra-Logic Inc. (TIL) ที่เมืองเออร์ไวน์ รัฐแคลิฟอร์เนีย เป็นระบบที่ใช้ในกล้องถ่ายรูปหรือกล้องถ่ายวิดีโอ เป็นระบบที่เกิดจากการใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่แก้ไขจุดอ่อนของระบบการโฟกัสแบบ TTL (ระบบ through-the lens) ระบบ TTL มีข้อเสียคือขาดความแม่นยำ แต่เมื่อใช้กับระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่ที่พิจารณาข้อมูลจากองค์ประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมาคิดร่วมในการปรับความถูกต้องของการโฟกัส ผลปรากฏว่าความแม่นยำของการโฟกัสดีขึ้นกว่าระบบเดิม 3 เท่า ทั้งที่ระบบนี้อาศัยกฎเกณฑ์เพียง 20 ข้อ ซึ่งบริษัท CANON ใช้ระบบโฟกัสแบบนี้ในแคมคอร์ดเดอร์รุ่นใหม่

ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร

เป็นระบบภายในอาคารของบริษัทมิตซูบิชิ เฮฟวี่ อินดัสทรี ซึ่งควบคุมการทำงานประสานกันของเครื่องทำความร้อนและเครื่องปรับอากาศ โดยใช้กฎเกณฑ์ 25 ข้อ สำหรับเครื่องทำความร้อนและอีก 25 ข้อ สำหรับเครื่องปรับอากาศ มีการใช้ข้อมูล เช่น การเปิดปิดประตูห้องของพนักงานเข้ามาคำนวณด้วยระบบที่ใช้คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก 8 บิตเป็นตัวควบคุม ผลปรากฏว่า ระบบนี้สามารถช่วยรักษาระดับของอุณหภูมิของอาคารให้คงที่ได้ดีกว่าเดิมเท่าตัว ลดการใช้ไฟฟ้าลงถึง 24% ใช้จำนวนตัว sensor น้อยกว่าระบบเดิม (ระบบที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารมักเป็นแบบ proportional integral differential method หรือ PID) ระบบแบบฟัซซี่สามารถพัฒนาขึ้นในเวลาเพียงเดือนเดียว

ระบบซื้อขายสต๊อก

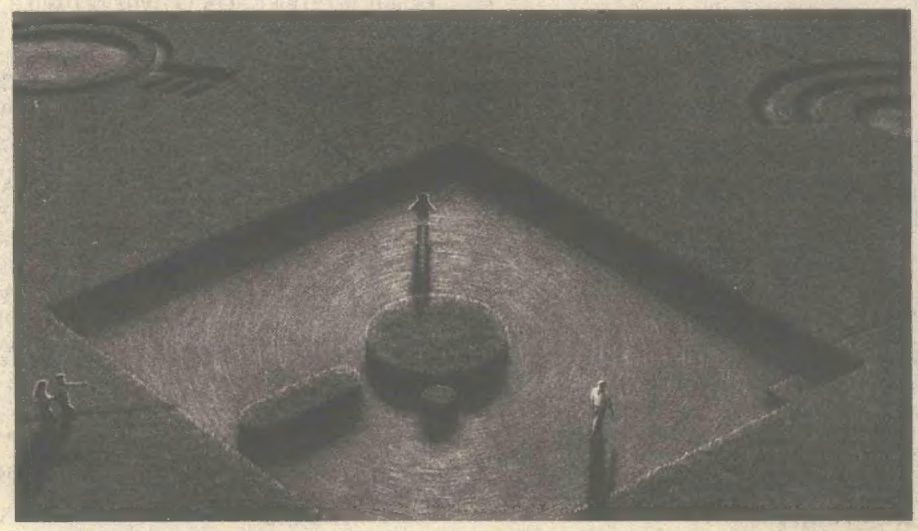
เป็นระบบของบริษัท Yamaichi Securities มีจำนวนกฎเกณฑ์ 800 ข้อ ใช้ในการซื้อขายสต๊อกในตลาด Nikkei Stock Exchange มีรายงานว่าระบบนี้ทำงานได้ดีกว่าตลาดถึง 20%

ระบบควบคุมเครื่องซักผ้า

ระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่มีราคาถูกและสร้างได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ปรับปรุงคุณภาพของเครื่องใช้ประเภทเครื่องซักผ้า ตู้เย็น เครื่องทำน้ำอุ่น ฯลฯ ในกรณีของเครื่องซักผ้า ระบบผู้เชี่ยวชาญสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของความใสของน้ำในถังซักผ้าของเครื่อง ความเข้มของน้ำยาซักผ้า จำนวนรอบการหมุนของถัง เหล่านี้นำมาใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่อง เช่น โดยการเพิ่มน้ำเข้าสู่ถัง ถ้าหากผงซักฟอกเข้มเกินไปผลที่ได้คือเครื่องซักผ้าที่ซักได้สะอาดกว่าเดิม และประหยัดพลังงานกว่าเดิมด้วย

บทสรุป

การใช้ประโยชน์ของระบบผู้เชี่ยวชาญในลักษณะของระบบควบคุมเป็นแนวความคิดที่ได้แสดงให้เห็นผลแล้วที่จริงความคิดในการใช้ "ซอฟต์แวร์-คอนโทรล" มีมาก่อน ตัวอย่างที่เห็นได้คือ การออกแบบคอนโทรลยูนิตในซีพียูของคอมพิวเตอร์โดยการใช้ไมโครโค้ดแทน hardware control unit วิธีการนี้เสนอโดย Wilk ตั้งแต่สมัยช่วงปี 1950 วิธีของ Wilk ใช้ลดปัญหาการออกแบบส่วนควบคุมของซีพียูได้เป็นอันมาก เป็นที่ทราบกันต่อมาว่าวิธีนี้ยังให้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ อีกด้วย เช่น ใช้ในการ customize คอมพิวเตอร์เพื่อใช้



ใช้งานเฉพาะอย่าง เป็นต้น ในปัจจุบันนี้วิธีการใช้เฟิร์มแวร์เป็นวิธีมาตรฐานในการออกแบบคอนโทรลยูนิต เป็นที่นิยมมากกว่าวิธีการใช้ฮาร์ดแวร์คอนโทรลแบบเก่า ในลักษณะเดียวกันนี้อาจมีทางเป็นไปได้ว่า การใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่ในการควบคุมระบบอัตโนมัติจะมาแทนที่วิธีการควบคุมแบบฮาร์ดแวร์ด้วยเหตุผลสี่ข้อดังนี้

1. สร้างได้ง่ายและรวดเร็วกว่า
2. มีราคาถูกกว่า
3. สามารถแก้ไขดัดแปลงให้เหมาะกับแต่ละสถานการณ์การใช้งานได้
4. มีประสิทธิภาพในการใช้งานดี

พัฒนาการขั้นต่อไปของระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่ อาจจะเป็นการผลิตไมโครชิพสำหรับการประมวลผลในระบบการควบคุมแบบฟัซซี่ เนื่องจากอัลกอริทึมที่ใช้ เช่น วิธีเซนทรอยด์ เป็นวิธีที่มาตรฐาน สามารถอิมพลีเมนต์ได้โดยสะดวกในเฟิร์มแวร์ในทางที่เสริมกัน การมีชิพในลักษณะนี้ขึ้นใช้ก็จะทำให้วิธีการใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่เป็นที่นิยมมากขึ้นอีก ราคาชิพก็จะถูกลงเป็นวงจรที่สนับสนุนซึ่งกันและกันดังที่เคยเป็นมากับไมโครโปรเซสเซอร์

ดังได้กล่าวในตอนต้นว่า ความรู้ทางระบบฟัซซี่ไม่ได้จำกัดอยู่แต่กับระบบผู้เชี่ยวชาญนี้เท่านั้น มีพัฒนาการในแนวทางอื่น ๆ ที่เป็นที่รู้จักกันในปัจจุบันแยกกันออกไปหลายด้าน ซึ่งบางอย่างก็เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์ใช้ในการแก้ปัญหาบางอย่างได้ดี เช่น เทคนิคที่เรียกว่า linguistic variable เพื่อจัดการกับปัญหาคำนามที่อาจมีคำวิเศษณ์ที่เป็นฟัซซี่มาขยายได้เช่น คำว่า ราคา ซึ่งอาจมีค่าเป็น "ถูก" หรือ "แพง" เป็นต้น เทคนิคอีกประการหนึ่งคือ การคำนวณ hedges ได้แก่ การให้ความหมายคำประเภทกริยาวลี เช่น "ตามธรรมดา" "บ่อย ๆ" "น้อย ๆ" ฯลฯ นอกจากนี้การศึกษาทางตรรกศาสตร์แบบฟัซซี่ ก็อาจนำมาใช้ประโยชน์ในระบบผู้เชี่ยวชาญโดยทั่วไปได้อีกด้วย (หมายถึงโปรแกรมระบบผู้เชี่ยวชาญแบบระบบที่ปรึกษา อย่างเช่น โปรแกรมมัยซิน (MYCIN ของ Shortliffe) โปรแกรมพรอสเพ็คเตอร์ (PROSPECTOR ของ SRI International แคลิฟอร์เนีย) อย่างไรก็ตาม ในระบบดังกล่าวจะต้องมีส่วนสำหรับจัดการกับความไม่แน่นอน ซึ่งเรียกกันในศัพท์ทางนี้ว่า uncertainty management

เทคนิคของระบบฟัซซี่ที่ใช้ในการประมวลผลภาษาธรรมชาตินำจะลองนำมาใช้กับภาษาไทย อาจจะทำให้มองเห็นสิ่งที่น่าสนใจใหม่ ๆ ก็เป็นได้

หนังสืออ้างอิง

1. (*) Zadeh, Lofti, A. Fuzzy Sets Information and Control, 8(3), June 1965.
2. (*) Schumucker, K. J. Fuzzy Sets: Natural Language Computation and Risk Analysis Computer Science Press, Mary Land, 1984.
3. (*) Schwartz, Tom J. Fuzzy Systems AI Expert, 5(8), August, 1990.
4. (*) Tanaka, K. & Mizumoto, M. Fuzzy and Probabilistic Program Information and Control, 1976.
5. (*) Zadeh, L.A. The Role of Fuzzy Logic in the Management of Uncertainty in Expert Systems Fuzzy Sets and Systems 11, 1983.

รายชื่อหนังสือเกี่ยวกับระบบฟัซซี่

1. Mamdani, E.H. Fuzzy Reasoning and Applications Academic Press, New York, 1981.
สำหรับเรื่องเกี่ยวกับตรรกศาสตร์แบบฟัซซี่ซึ่งอาจปรับใช้ในโปรแกรมระบบผู้เชี่ยวชาญ แต่ถ้าจะศึกษาการใช้ตรรกศาสตร์แบบฟัซซี่ในโปรแกรมระบบผู้เชี่ยวชาญ โดยเฉพาะควรศึกษาจากงานของซาเดห์โดยตรง

2. Negoita, C. V. & Ralescu, D. Application of Fuzzy Sets to Systems Analysis Basel : Birkhauser, 1975.
สำหรับการนิยามเป็นคณิตศาสตร์ของระบบ abstract system อธิบายโครงสร้างทางคณิตศาสตร์อาศัย lattice เป็นหนังสืออ่านพื้นฐานทางระบบฟัซซี่เพื่อความเข้าใจทั่ว ๆ ไป

3. Bezdek, J. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms Plenum Press, New York, 1981.
สำหรับวิธีการทาง pattern recognition

4. Dubois, D. and Prade, H. Fuzzy Sets and Systems : Theory and Application Acdemic Press, New York, 1980.
สำหรับเรื่องทั่วไปเกี่ยวกับฟัซซี่เซต สองท่านนี้เขียนหนังสืออีกเล่มหนึ่งชื่อ Fuzzy Number สำหรับปฏิบัติการของตัวเลขฟัซซี่

5. Schumucker, K. J. Fuzzy Sets : Natural Language Computation and Risk Analysis Computer Science Press, Mary Land, 1984.
สำหรับการใช้ประโยชน์ฟัซซี่เซตในทาง natural language processing เป็นเล่มที่อ่านง่ายที่สุด

6. Advances in Fuzzy Sets, Possibility Theory and Applications Edited by Paul P. Wang, Plenum Press, New York, 1983.
เป็นหนังสือรวบรวมบทความเกี่ยวกับงานฟัซซี่เซตหลาย ๆ ด้าน

7. Advances in Fuzzy Set Theory and Applications Edited by Madan M. Gupta, Rammohan K. Rajade, Ronald R. Yager, North-Holland, Amsterdam, 1984.
เป็นหนังสือที่รวบงานเกี่ยวกับ systems ไว้ค่อนข้างมาก ตัวอย่างเช่น การนิยาม fuzzy automata แบบต่าง ๆ

8. Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes Edited by Lofti A. Zadeh & King Sun Fu, Academic Press, New York, 1975.